

Diseño de un Robot Autónomo para la Limpieza de Paneles Solares de Bajo Costo

D. Rubio Alvarado ^{#1}, E. Zayan Gutiérrez ^{#2}, V. Cerda Castañeda ^{#3}, O. F. Lomeli Solis ^{#4},
S. Salazar Gómez ^{#5}

[#] Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico José Mario Molina Pasquel y Henríquez,
Unidad Académica Zapotlanejo, Jalisco, México.

¹ zt220111985@zapotlanejo.tecmm.edu.mx, ² zt230111933@zapotlanejo.tecmm.edu.mx,

³ zt220110407@zapotlanejo.tecmm.edu.mx, ⁴ zt230113083@zapotlanejo.tecmm.edu.mx,

⁵ salvador.salazar@zapotlanejo.tecmm.edu.mx

Resumen— El mantenimiento adecuado de los paneles solares es fundamental para garantizar su eficiencia y prolongar su vida útil. La acumulación de polvo y suciedad puede reducir significativamente la captación de energía, afectando el rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. Así como también los peligros para las personas que se encargan del mantenimiento y limpieza de los paneles, ya que se exponen a lugares de difícil acceso, o la inclinación del panel, así como el uso de agua y jabón que aportan a el peligro. Este artículo presenta el diseño y desarrollo de un robot autónomo de limpieza de paneles solares de bajo costo, dirigido a pequeñas y medianas empresas y usuarios individuales. El robot utilizará un sistema de rodillos motorizados, sensores para la navegación autónoma y detección de caídas. Se presenta el diseño del sistema, los componentes electrónicos, el algoritmo de control y los resultados esperados de las pruebas experimentales.

Palabras clave— Energía, Eficiencia, Robótica, Paneles solares.

I. INTRODUCCIÓN

La generación de energía solar ha cobrado gran relevancia en los últimos años como una alternativa sostenible frente al uso de combustibles fósiles. Sin embargo, para asegurar su eficiencia y rentabilidad, es indispensable mantener los paneles solares en condiciones óptimas. Uno de los principales desafíos es la acumulación de polvo, polen y otros residuos que reducen significativamente su rendimiento energético. A esto se suman los riesgos asociados a la limpieza manual, especialmente cuando se realiza en superficies elevadas o inclinadas, lo que puede ocasionar accidentes laborales graves.

Para mitigar estas complicaciones operativas, el presente trabajo documenta la construcción de un mecanismo robótico independiente enfocado en el aseo de módulos fotovoltaicos. La meta principal radica en proporcionar una herramienta económicamente viable para instalaciones residenciales y comerciales de menor escala, permitiendo sostener los niveles de producción eléctrica sin desperdiciar recursos hídricos. Empleando herramientas de modelado tridimensional, manufactura aditiva y electrónica comercial, se estructuró una alternativa técnica que sustituye la

exposición de operadores humanos por un sistema automatizado, promoviendo prácticas más seguras y eficientes en la gestión de las granjas solares.

II. JUSTIFICACIÓN

La creciente adopción de sistemas de energía solar en México ha traído consigo la necesidad de mantener los paneles solares limpios para asegurar su eficiencia. Sin embargo, las prácticas actuales de limpieza, que a menudo implican trabajos en altura, han incrementado el riesgo de accidentes laborales.

Según datos de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social STPS, en 2016 se registraron 394,202 accidentes de trabajo en el país, de los cuales 106,728 (27%) fueron causados por caídas, muchas desde alturas superiores a 1.80 metros. Estos accidentes no solo representan un riesgo para la salud y seguridad de los trabajadores, sino que también generan costos adicionales para las empresas y afectan la continuidad operativa [1].

La concepción de este equipo automatizado prioriza la implementación de mecanismos de aseo de bajo consumo hídrico, prescindiendo totalmente de agentes químicos abrasivos. Esta integración tecnológica favorece no solo la máxima captación de las celdas fotovoltaicas, sino que también garantiza que los protocolos de mantenimiento cumplan con rigurosos estándares de responsabilidad ecológica.

La acumulación de suciedad en los paneles solares, como polvo, polen, excrementos de aves y otros residuos, puede reducir significativamente su eficiencia energética. Estudios indican que la pérdida de rendimiento debido a la suciedad puede variar entre un 3 % y un 5%, dependiendo del tipo y grado de acumulación [2].

III. FORMULACIÓN DE PROBLEMA

Los paneles solares presentan una eficiencia de laboratorio relativamente baja. Esta eficiencia se ve aún más afectada por diversos factores ambientales, como las altas temperaturas y, especialmente, la acumulación de suciedad. En gran parte del

país, debido a las condiciones naturales, existe una considerable presencia de polvo en el ambiente, el cual se deposita sobre la superficie de los paneles solares, obstaculizando la captación de radiación solar y, disminuyendo la producción de energía eléctrica.

Si bien el mantenimiento manual ejecutado por cuadrillas especializadas logra mitigar la deposición de partículas y restaurar la curva de generación eléctrica, esta dinámica operativa expone a los técnicos a riesgos ocupacionales severos. La ausencia frecuente de equipo de protección personal adecuado y la ejecución de maniobras en superficies inestables o inclinadas han propiciado siniestros laborales, registrando incluso desenlaces fatales.

Como alternativa comercial, existen sistemas de lavado automatizado basados en aspersión hídrica a presión. A pesar de su viabilidad en escenarios específicos, estos mecanismos exigen un volumen de consumo de agua insostenible y, mecánicamente, carecen de la fricción directa necesaria para desprender suciedad incrustada. Simultáneamente, las barreras económicas de adquisición y mantenimiento de dicha maquinaria resultan prohibitivas para el presupuesto del sector de las pequeñas y medianas empresas.

A. Pregunta de investigación

¿Cómo desarrollar un robot autónomo para la limpieza de paneles solares que sea más económico que las soluciones existentes sin sacrificar eficiencia ni funcionalidad?

B. Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un dispositivo autónomo para la limpieza de paneles solares que contribuya a reducir los accidentes laborales, minimice el desperdicio de agua y sea económicamente accesible para usuarios de pequeña y mediana escala.

Objetivos específicos

- Investigar y evaluar diferentes métodos de limpieza que optimicen el uso del agua y aseguren una remoción eficaz de suciedad.
- Diseñar el prototipo del dispositivo utilizando el software SolidWorks.
- Estructurar la lógica algorítmica encargada de la navegación y el manejo de los actuadores.
- Ejecutar ensayos físicos en campo para evaluar el desempeño operativo y la fiabilidad del mecanismo.

IV. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

El rendimiento eléctrico de los arreglos solares es sumamente sensible a la presencia de hollín, arena y otros depósitos superficiales [3]. Las intervenciones manuales para retirar estos elementos suponen peligros de caída y un gasto volumétrico de agua considerable, un aspecto crítico en zonas con estrés hídrico [4]. Frente a estas limitantes, la

implementación de un equipo mecatrónico automatizado proporciona una alternativa técnica, segura y sustentable para el mantenimiento de las celdas.

Estudios demuestran que la acumulación de polvo puede reducir la eficiencia de los paneles solares entre un 15% y 35%, dependiendo de las condiciones ambientales [3]. Un sistema de limpieza automatizado puede mitigar estas pérdidas, optimizando la generación de energía. Cabe señalarlo como se muestra en la figura 1.



Fig. 1. Panel solar fotovoltaico con suciedad [4].

La ejecución de labores de lavado directo sobre techumbres y plantas de generación a gran escala expone a los operarios a caídas de altura y siniestros ocupacionales. Delegar estas maniobras a un sistema mecatrónico suprime dichas vulnerabilidades, garantizando la estricta conformidad con los marcos regulatorios de seguridad industrial [5].

Cabe mencionar que los métodos tradicionales de limpieza consumen grandes volúmenes de agua, especialmente en regiones áridas. Prototipos que utilizan cepillos rotativos, aire comprimido o sistemas de vibración reducen o eliminan este consumo [6].

V. DESARROLLO

A. Componentes y Diseño del Robot

- El robot estará compuesto por los siguientes módulos:
- Microcontrolador: Arduino Mega, encargado del control central.
- Sensores:
 - MPU6050: Detección de inclinación y orientación.
 - HC-SR04: Detección ultrasónica de bordes y obstáculos.
 - SP8266: Comunicación inalámbrica a través de Wi-Fi para monitoreo y control remoto.
- Motores DC: Encargados de accionar el sistema de limpieza (rodillos).
- Puentes H: Controlan la dirección y velocidad de los motores DC.
- Llantas Omnidireccionales: Permiten el desplazamiento lateral y rotacional del robot sobre los paneles solares.

- Llantas omnidireccionales utilizadas en el robot, que permiten el movimiento en todas las direcciones.

Para la propuesta de sistema de movilidad para el prototipo y garantizar el desplazamiento estable del dispositivo sobre superficies inclinadas y lisas donde el riesgo de derrape es elevado se optó por implementar ruedas omnidireccionales como se muestra en la figura 2. Esta solución permite: movimiento libre y multidireccional, adaptable a distintas orientaciones de los paneles también Sujeción adecuada, minimizando el deslizamiento incluso en pendientes pronunciadas.

Como alternativa, se evaluó un sistema de ventosas; sin embargo, este requeriría: componentes adicionales (bombas de vacío, sensores de presión) y mayor consumo energético, lo que reduciría la autonomía del prototipo.

En consecuencia, el tren de tracción omnidireccional se determinó como la alternativa mecánica de mayor factibilidad y rendimiento operativo.

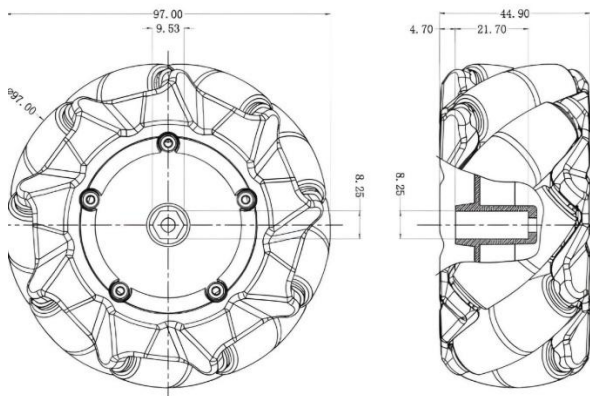


Fig. 2. Vista de frente y costado de ruedas Omnidireccionales [3].

Con el propósito de analizar la viabilidad cinemática y la distribución espacial del hardware, se construyó una maqueta electromecánica preliminar. Esta plataforma de ensayo facilitó la delimitación de las tolerancias estructurales, el ajuste en el posicionamiento de los actuadores, la sensorica y el tren de rodaje, así como la ejecución de las primeras evaluaciones operativas en un entorno físico de trabajo.

La arquitectura fundamental de este modelo temprano se detalla en la Figura 3. La retroalimentación empírica recolectada durante esta etapa experimental resultó determinante para confirmar la viabilidad técnica del mecanismo, estableciendo las bases para su posterior digitalización paramétrica en SolidWorks. Dicha transición al entorno CAD agilizó la optimización geométrica de los ensambles y la corrección de interferencias mecánicas previo a la manufactura aditiva de la versión definitiva.

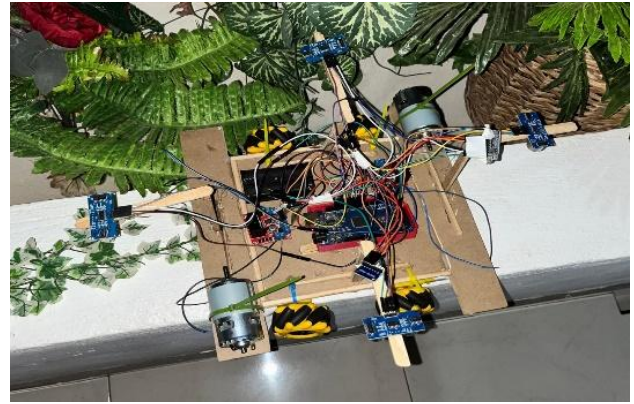


Fig. 3 prototipo

Una vez comprobada la cinemática y la ubicación estratégica de la sensorica en el modelo de prueba, la ingeniería del proyecto migró hacia el modelado paramétrico definitivo. La consolidación de esta etapa en el entorno CAD permitió estructurar la geometría tridimensional del chasis principal, optimizando sus tolerancias y espesores estructurales para someterlo directamente a procesos de manufactura aditiva, destacando las siguientes especificaciones:

- Modelado CAD completo que integra todos los componentes validados.
- Preparación para fabricación aditiva, optimizando el diseño para producción 3D
- Evaluación directa en paneles solares fotovoltaicos reales.

En las Figuras 4 y 5 se muestran las vistas isométricas del chasis final. Dicha representación virtual constituye el ensamble de referencia definitivo para la materialización de los componentes y la subsecuente ejecución de los ensayos experimentales in situ.

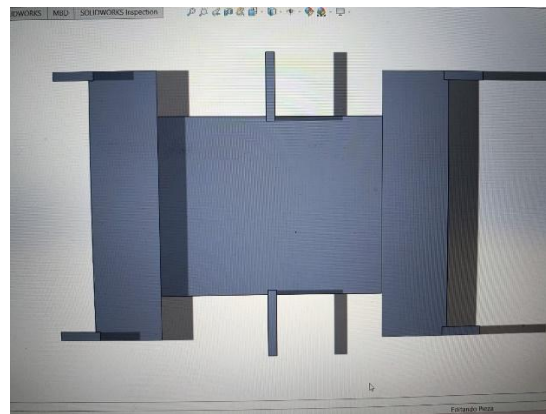


Fig. 4. Vista de planta de chasis en prototipo.

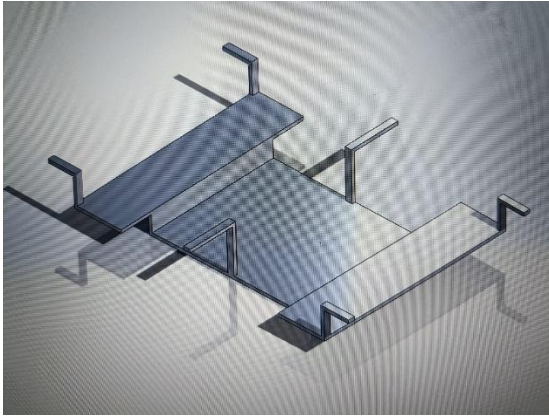


Fig. 5. Vista simétrica del chasis en prototipo.

Después se programó al software de cura 5.8.1 para comenzar la impresión de las piezas como se muestra en la figura 6.

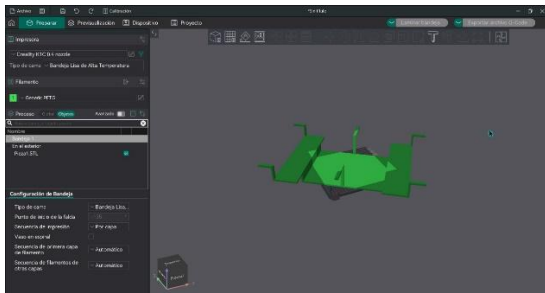


Fig. 6 diseño de chasis de prototipo en venta de trabajo de software Cura.

B. Fase de fabricación y evaluación continua

Una vez completado el diseño del chasis, se procedió a preparar los archivos para manufactura aditiva utilizando el software Cura Figura 4. Actualmente, el proyecto se encuentra en esta etapa de fabricación de los componentes mediante impresión 3D. Los avances obtenidos hasta este punto se puede observar optimización de costos demostrada mediante las pruebas de las fases anteriores, también la validación del proceso de fabricación mediante tecnología de impresión 3D y la Identificación de oportunidades de mejora que serán implementadas en iteraciones posteriores.

A pesar de la funcionalidad validada en esta primera iteración física, el diagnóstico operativo reveló oportunidades de optimización técnica, destacando:

La integración de estas modificaciones mecánicas y de software en los próximos ciclos de ingeniería resultará crucial para maximizar el rendimiento de lavado y garantizar la estabilidad operativa del equipo.

VI. CONCLUSIÓN

La integración de un robot autónomo en las rutinas de mantenimiento fotovoltaico constituye una respuesta técnica factible y económicamente prudente ante los problemas de ensuciamiento y pérdida de eficiencia. Al reemplazar la intervención humana directa, se erradica la posibilidad de siniestros por trabajo en alturas y se estandariza la calidad de la limpieza. El presente prototipo, apoyado en técnicas de manufactura aditiva, modelado paramétrico y electrónica de fácil acceso, demuestra que es posible desarrollar tecnología asequible para pequeñas empresas. Esta iniciativa protege el rendimiento de las instalaciones solares, vela por la integridad física de los operarios e impulsa un modelo de conservación que minimiza el consumo de recursos hídricos.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría del Trabajo y Previsión Social (2017). Representan caídas el 27 por ciento de los accidentes de trabajo en México, [En línea]. Disponible en: [https://www.gob.mx/stps/prensa/representan-caidas-el-27-por-ciento-de-los-accidentes-de-trabajo-en-mexico?](https://www.gob.mx/stps/prensa/representan-caidas-el-27-por-ciento-de-los-accidentes-de-trabajo-en-mexico?__gta__=1)
- [2] PVPS, IEA. *Soiling Losses—Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants*. IEA PVPS: Paris, France (2022).
- [3] Y. Chen, Y. Liu, Z. Tian, Y. Dong, Y. Zhou, X. Wang, and D. Wang, “Experimental study on the effect of dust deposition on photovoltaic panels,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 483-489, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.139>.
- [4] N. Nouhaila, and A. Rachid, “A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques,” *Energies*, vol. 16, no. 24: pp. 7960, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16247960>.
- [5] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), (2026). Fall protection in construction. U.S. Department of Labor, 2020. [Online]. Available: <https://www.osha.gov/fall-protection>.
- [6] H. Kawamoto and T. Shibata, “Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels,” *Journal of Electrostatics*, vol. 73, pp. 65-70, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.10.011>.